

双视场准共路多普勒外差干涉仪光学系统设计

费小云^{1,2} 冯玉涛¹ 白清兰¹ 谢念^{1,2} 李勇¹ 闫鹏¹ 孙剑¹

¹中国科学院西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710119

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 针对大气风场矢量的星载探测应用,提出一种双视场准共路多普勒外差干涉仪方案,其采用平面镜视场耦合、Kösters棱镜单光栅干涉仪和一维成像镜的系统结构,可以同时探测两个正交方向不同高度层的视线风速,具有结构紧凑、无运动部件、探测效率高等特点。推导了基于Kösters棱镜的准共路干涉仪非对称量 Δd 与光栅利特罗角、分光棱镜尺寸等初始光学参数的关系。以基于氧原子红线(O^{[1}D]630 nm)进行星载高层大气风场探测为例,给出了参数优化和系统设计的过程及结果,并对全系统干涉图进行建模仿真。结果表明:双视场准共路多普勒外差干涉仪具有一维空间分辨能力,在不使用视场扫描装置的情况下就可获得两个视场方向不同高度层上的干涉图,借助卫星平台运动可以获得同一目标区域的风场矢量信息。

关键词 光学设计;干涉仪;双视场;多普勒效应;风场探测

中图分类号 O439

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0422003

Optical System Design of a Co-Path Doppler Asymmetric Spatial Heterodyne Interferometer with Two Fields of View

Fei Xiaoyun^{1,2} Feng Yutao¹ Bai Qinglan¹ Xie Nian^{1,2} Li Yong¹ Yan Peng¹ Sun Jian¹

¹*Xi'an Institute of Optics Precision Mechanic of Chinese Academy of Sciences, Xi'an, Shaanxi 710119, China*

²*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*

Abstract A co-path Doppler asymmetric spatial heterodyne spectroscopy (DASH) interferometer with two fields of view to apply to wind vector observations from satellite is presented. The instrument using mirrors as field combiners, Kösters prism as beam splitter, one grating and imaging lens with focal power in one dimension can observe winds at different elevations in two orthogonal look directions. It is compact, without moving parts and efficient. An exact relation of the path offset Δd to Littrow angle and the size of Kösters prism is derived. A system for observation of the O^{[1}D]630 nm emission from satellite is designed to show the process and result of parameters optimizing. Finally, a simulated result for the system indicate that the co-path DASH interferometer with two fields of view has space resolution ability in one dimension, it can get the interferograms at different elevations in two directions without scanning parts and it is possible to obtain the wind vector for the same volume with the help of satellite's moving.

Key words optical design; interferometer; two fields of view; Doppler effect; wind observation

OCIS codes 220.4830; 300.6310; 280.4991; 120.6200

1 引 言

多普勒外差干涉光谱技术(DASH)是2006年由美国海军实验室^[1]提出的一种新型大气风场被动探测技术,与迈克耳孙干涉技术^[2-3]和法布里-珀罗(F-P)干涉技术^[4]相比,多普勒外差干涉光谱技术对元件工艺要求低,系统中无运动部件,可同时测量多条谱线。2010年,Englert等^[5]利用多普勒外差验证装置(REDDI)获得了O^{[1}D]630 nm气辉的地基观测量结果,与磨石山天文台F-P干涉仪观测结果符合良好。

收稿日期: 2014-09-02; 收到修改稿日期: 2014-11-17

基金项目: 国家自然科学基金(41005019)

作者简介: 费小云(1989—),女,硕士研究生,主要从事光学系统设计方面的研究。E-mail: feixiaoyun_opt@163.com

导师简介: 冯玉涛(1980—),男,博士,副研究员,主要从事光谱成像技术方面的研究。E-mail: fytciom@126.com

星载探测大气风场矢量需要测量同一目标区域在两个不同方向的标量视线风速,合成得到该目标区域的风场矢量信息。一般选择两垂直方位:分别与卫星平台运动方向呈 45° 和 135° ,对同一观测区域先以 45° 方向视场探测一次,随后再以 135° 方向视场探测,假设在两次探测时间间隔内风场信息未发生改变。对于单视场的探测系统,这个过程中需要借助视场扫描装置,先后指向上述两个方向完成探测,例如高分辨率多普勒成像仪(HRDI)^[4]。对于双视场系统则借助卫星平台的运动实现对同一目标区域进行两个不同方向的延时观测,例如多普勒干涉仪(TIDI)^[6]、风场成像干涉仪(WINDII)^[3]。另外为实现不同高度层风场临边观测,每个仪器视场要具有垂直方向的空间分辨率或垂直高度扫描功能。

多普勒外差干涉仪为等厚定域干涉,为弥散源探测,从干涉原理上不具备 WINDII 那样二维成像能力,针对这一问题,本文提出一种双视场准共路多普勒外差干涉仪方案,系统具有同时探测两个正交方向不同高度层上大气风速的能力,且结构紧凑、无运动部件,非常适合高层大气风场星载探测应用。

本文首先介绍多普勒外差干涉仪风场探测原理,然后介绍了双视场准共路多普勒外差干涉仪方案,接着分析推导了基于 Kösters 分光棱镜的准共路多普勒外差干涉仪非对称量与干涉仪元件基本参数之间的关系,最后针对氧原子红线 630 nm,完成了干涉仪参数优化和全系统光学设计,并通过全系统仿真建模验证了系统可行性及探测能力。

2 多普勒外差干涉仪风场探测原理

多普勒外差干涉仪将迈克耳孙干涉仪中两臂的平面反射镜分别用与光轴有一定倾角且位置固定的衍射光栅代替,并在干涉仪两臂之间引入一定的非对称量 Δd ,如图 1 所示。干涉仪出瞳处有两个呈一定夹角的出射波前,这两个出射波前相互叠加产生菲佐型干涉条纹并被成像在探测器上。条纹的空间频率是目标谱线波数 σ 与外差波数 σ_1 之差的函数,对于入射光谱 $B(\sigma)$,其干涉强度为

$$I(x) = \int_0^\infty B(\sigma) \{1 + \cos\{2\pi[4(\sigma - \sigma_1)\tan\theta_L \cdot x + 2\Delta d \cdot \sigma]\}\} d\sigma, \quad (1)$$

其中 θ_L 为衍射光栅的利特罗角,当入射目标谱线存在大气运动引起的多普勒频移时,探测到的谱线波数变化量 $\Delta\sigma$ 满足关系: $\Delta\sigma/\sigma = v/c$, v 是大气运动引起的风速, c 是光速,则干涉强度函数(1)式变为

$$I(x) = \int_0^\infty B(\sigma) \{1 + \cos\{2\pi[4(\sigma + \Delta\sigma - \sigma_1)\tan\theta_L \cdot x + 2\Delta d(\sigma + \Delta\sigma)]\}\} d\sigma, \quad (2)$$

则在探测器像元 $x=0$ 位置,相位变化量为

$$\delta\varphi_{x=0} = 4\pi \cdot \Delta d \cdot \Delta\sigma = 4\pi \cdot \Delta d \cdot \sigma \frac{v}{c}. \quad (3)$$

由(3)式可见,只要分别得到无多普勒频移和存在多普勒频移时基础光程位置干涉曲线相位,即可反演出风速值。

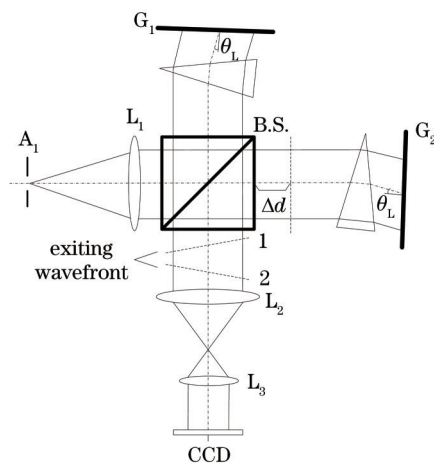


图 1 多普勒外差干涉仪原理图
Fig.1 Schematic diagram of a DASH interferometer

大气气辉谱线受到温度和压力影响,会引起谱线的展宽,这会导致干涉条纹对比度随着光程差的增大下降,为获得最高的相位探测灵敏度,干涉仪非对称量存在一个与谱线线型函数半宽相关的最优值,仅考虑温度引起的谱线展宽,最佳光程差为^[7]

$$2\Delta d_{\text{OPT}} = \frac{1}{2\pi\sigma_D}, \quad (4)$$

其中 σ_D 为谱线宽度:

$$\sigma_D = \sigma_0 \sqrt{\frac{kT}{mc^2}}, \quad (5)$$

其中 σ_0 是谱线中心波数, k 是玻尔兹曼常数, T 是大气温度, m 是谱线源的原子质量, c 是光速。

3 双视场准共路干涉仪

双视场准共路干涉仪结构如图2所示,系统由双视场耦合组件、干涉仪、条纹成像系统和电荷耦合器件(CCD)探测器组成。干涉仪系统前端有两组望远物镜系统分别对 45° 和 135° 方位目标成像,两个视场探测目标的一次像在干涉仪视场光阑处耦合,耦合结果如图3中虚线框内图所示,干涉仪视场光阑上半区域的像来自视场1,下半区域的像来自视场2,二者相互独立,无重叠区域,一次像经准直镜后以不同入射角的平行光束入射到干涉仪系统。后续仿真也是基于这种假设。耦合的具体方式不是本文的重点,图中仅用两平面镜示意。

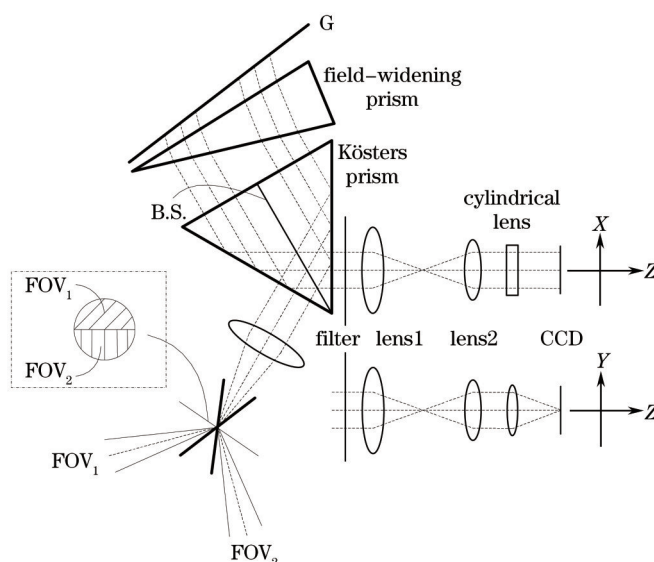


图2 双视场准共路多普勒外差干涉仪原理图

Fig.2 Schematic diagram of a common-path DASH interferometer with two fields of view

干涉仪采用基于Kösters棱镜准共路结构形式,Kösters分光棱镜由两个 $30^\circ-60^\circ-90^\circ$ 直角棱镜沿长直直角面胶合而成,胶合面作为分光面镀有半透半反膜。入射光经Kösters分光棱镜分成强度相等的两束光,且两光路光轴相互平行,使两光路可以共用一个扩视场棱镜和衍射光栅,降低了系统的装调难度,同时当干涉仪随温度变化整体形变,非对称量不变,使基础光程差对温度敏感性大大降低,提高系统的热稳定性。

成像光学系统中加入柱面镜组,仅在垂直干涉仪主截面一维(图中所示的Y方向)有光焦度。将混叠的干涉条纹在垂直主截面方向一维压缩后成像,来自不同高度方向视场的目标谱线的干涉条纹被成像在探测器不同位置。

4 光学系统设计

光学系统设计首先要根据风场探测光谱分辨率、空间分辨率、基础光程差和干涉图信噪比的要求确定仪器初始光学参数。双视场准共路多普勒外差干涉仪光谱分辨率和干涉图信噪比与初始光学参数之间的

关系与传统空间外差光谱仪^[8-9]相同,参考文献[7]已详细论述;而基础光程差和空间分辨率与光学初始参数关系需要特别研究。

4.1 非对称量计算

根据第2节所述,考虑气辉谱线展宽,系统基础光程差存在一个与谱线线型函数半宽相关的最优值,而基础光程差由与系统干涉仪结构尺寸相关的非对称量引入,非对称量与干涉仪结构参数的关系是干涉仪设计的关键。

如图3所示的准共路多普勒外差干涉仪方案,入射光束被 Kösters 棱镜分成强度相等的两束光,两独立光束平行出射,经扩视场棱镜后,以利特罗角 θ_L 入射到光栅上。系统两支路的非对称量 Δd 可以表示为

$$\Delta d = n(d_2 + d_3) + d_4 - d_1, \quad (6)$$

式中 n 为扩视场棱镜材料的折射率, $d_1 \sim d_4$ 为4个辅助量,如图3所示。

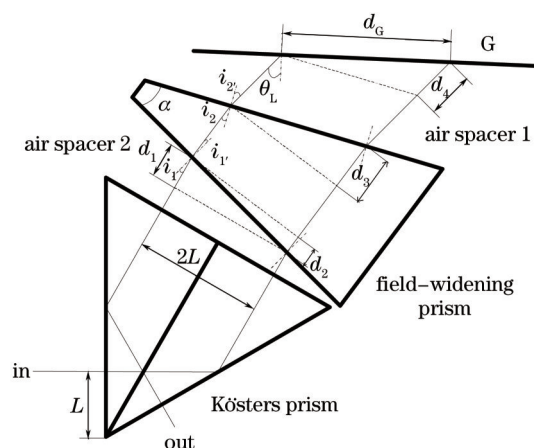


图3 准共路多普勒外差干涉仪光路图

Fig.3 Ray trace of a common-path DASH interferometer

扩视场棱镜主截面内,两光路入射到扩视场棱镜两个界面处满足折射定律,轴上光线在两界面处的入射角分别为 i_1, i_2 , 对应的折射角为 i_1' 和 i_2' 。在光栅色散主截面内,两光路光轴在光栅上的距离为 d_G , 表示为

$$d_G = \frac{2L \cos i_1' \cos i_2'}{\cos i_2 \cos i_1 \cos \theta_L}. \quad (7)$$

分光棱镜主截面内, L 是入射光束光轴到分光棱镜棱边的距离,如图3所示。

非对称量 Δd 表示为

$$\Delta d = \frac{2L \cos i_1' \cos i_2'}{\cos i_2 \cos i_1 \cos \theta_L} \sin \theta_L. \quad (8)$$

当光线以最小偏向角入射到扩视场棱镜^[10]时,(7)式和(8)式简化为

$$\begin{aligned} d_G &= \frac{2L}{\cos(\theta_L)} \\ \Delta d &= 2L \tan(\theta_L) \end{aligned} \quad (9)$$

由(9)式可见,系统非对称量 Δd 仅与利特罗角和入射光束光轴的入射高度 L 有关,与扩视场棱镜材料折射率无关。扩视场棱镜顶角确定后,只要干涉仪中两个空气间隔角度保持不变,各元件间的距离改变后不会影响系统非对称量,这样干涉仪随温度变化整体形变不会改变系统基础光程差,系统的热稳定性好。

4.2 空间分辨率

大气风场星载临边探测空间分辨率分为垂直分辨率 R_v 和水平分辨率 R_h ,对于双视场准共路多普勒外差干涉仪观测距离为 l ,一维成像系统焦距为 f ,探测器像元尺寸为 x ,干涉仪沿主截面方向视场为 θ_h ,则有如下关系:

$$\begin{aligned} R_v &= \frac{x}{f} l \\ R_h &= l \tan \theta_h \end{aligned} \quad (10)$$

4.3 设计实例

假定在轨道高度为 500 km 卫星平台上对 200~300 km 高度大气风场进行探测,目标谱线为氧原子红线 (O^1D)630 nm),温度为 1000 K,垂直分辨率 2km,水平分辨率 50 km。探测器为面阵 CCD,像元尺寸为 $13 \mu\text{m} \times 13 \mu\text{m}$,有效工作像元数为 500 pixel(垂直) \times 1024 pixel(水平),垂直方向将 5 个像元当作一个像元使用。仅考虑温度引起的谱线展宽,630 nm 谱线的最佳光程差为 $4.2 \text{ cm}^{[1]}$ 。干涉仪系统参数如表 1 所示。

表 1 准共路多普勒外差干涉仪系统参数

Table 1 Parameters of the common-path DASH interferometer

Parameter	Value
Grating	Groove density: 1200 g/mm Littrow wavelength: 632.8 nm
Air spacer 1	Apex angle: 6.553°
Field-widening prism	Apex angle: 16.316° Material: H-ZF62
Air spacer 2	Apex angle: 15.761°
Beam splitter	Kösters: 96 mm(side) \times 48 mm(thick) Material: H-K9L

考虑到加工和装调可实现性,干涉仪元件间的最小空气间隔和扩视场棱镜最小厚度在 9~11.5 mm 范围。在本设计实例中,光栅的像离干涉仪出射端距离约为 -106 mm,负号表示光栅被扩视场棱镜、分光棱镜所成的像是虚像。

根据上述设计的系统参数,确定透镜组 L_1 和 L_2 焦距相等且 $f'=100 \text{ mm}$,入瞳直径为 $D=20 \text{ mm}$,半视场角 $\omega=3.12^\circ$ 。透镜组 L_1 的光瞳前置量取 120 mm,透镜组 L_2 采用倒置设计方式,光瞳前置量取 70 mm,二者均为像方远心。

柱面镜 $F/\#=2$,焦距 $f'=60 \text{ mm}$,半视场角 $\omega=3.12^\circ$ 。优化后全系统光路图如图 4 所示,仅显示了柱面镜没有光焦度的一维,全系统光阑设置在光栅上, $F/\#=3$,半视场角 $\omega=3.12^\circ$ 。柱面镜的加入使全系统一维为无光焦度,另一维焦距为 60 mm。柱面镜最后一面距离探测器距离为 18 mm。

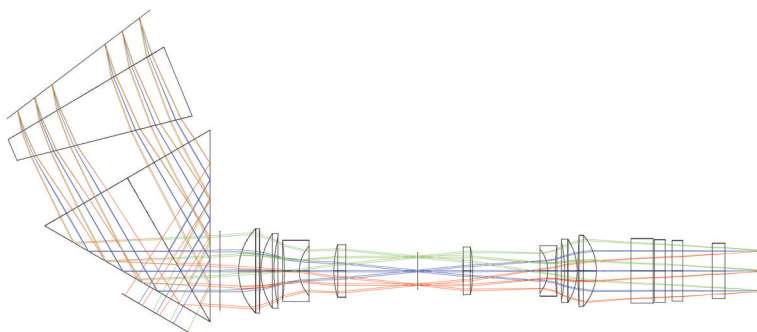


图 4 多普勒外差干涉仪光学系统图

Fig.4 Diagram of DASH interferometer optical system

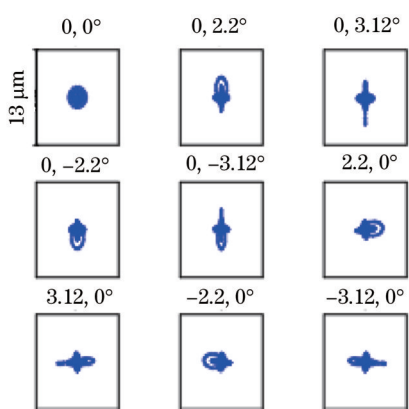


图 5 系统点列图

Fig.5 Spot diagram of the system

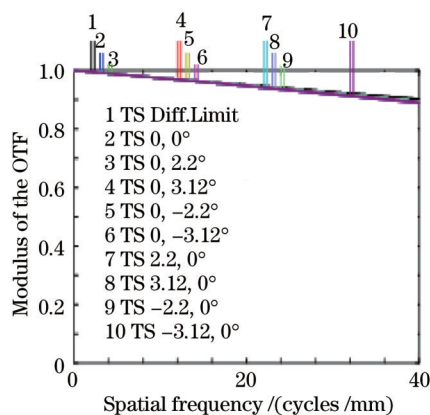


图 6 系统调制传递函数

Fig.6 MTF of the system

干涉仪元件采用二重结构模拟 1:1 分光效果。图 5 是系统点列图,此时将柱面镜组设置成普通透镜,图中矩形框尺寸和一个像元尺寸相等。加入干涉仪后系统失去了旋转对称性,故对 X 视场(± 0.707 、 ± 1)和 Y 视场(0 、 ± 0.707 、 ± 1)均进行了分析,各个视场弥散斑尺寸小于像元尺寸。图 6 是系统调制传递函数(MTF),在 40 lp/mm 处,各视场传函值均大于 0.8。图 7(a)所示是系统在 x 维的场曲和畸变曲线,图 7(b)所示是系统在 Y 维的场曲和畸变曲线,全系统最大畸变的绝对值小于 0.2%。

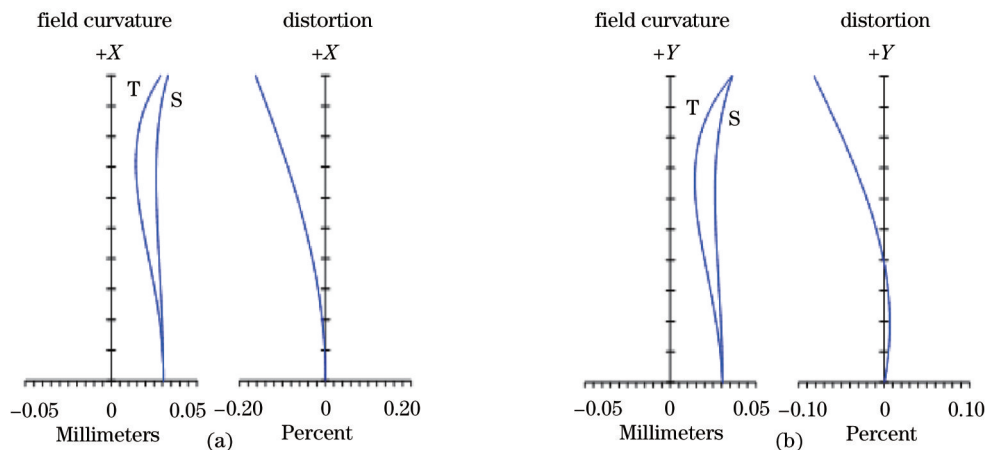


图 7 (a)场曲和(b)畸变曲线

Fig.7 Curves of (a) field curvature and (b) distortion

5 仿真实验

双视场准共路多普勒外差干涉仪实体图如图 8 所示。假定干涉仪同时接收 6 个视场($0^\circ, 0.573^\circ$)、($0^\circ, 0.344^\circ$)、($0^\circ, 0.172^\circ$)、($0^\circ, -0.172^\circ$)、($0^\circ, -0.344^\circ$)、($0^\circ, -0.573^\circ$)入射目标辐射,对应的光源谱线为: 630、630.5、631.0、631.5、632.0、632.5 nm),实际观测中,630 nm 谱线、10 m/s 风速对应的多普勒波长漂移约 1.8×10^{-5} nm,干涉条纹相位变化约为 10 mrad。为说明双视场准共路多普勒外差干涉仪具有不同高度层分辨能力,上述波长取值范围较大,以便从干涉条纹周期直观体现不同视场间的区别。

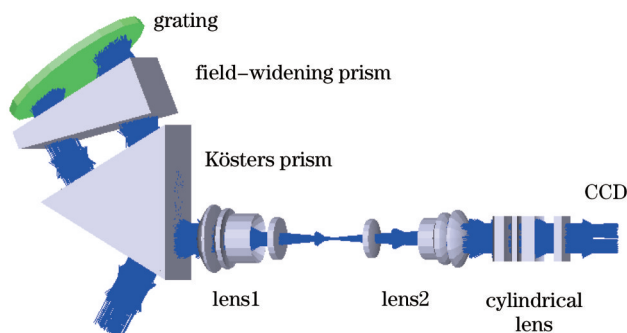


图 8 多普勒外差干涉仪光学系统实体模型

Fig.8 Solid model of the DASH interferometer optical system

模拟不同视场的光谱线入射,如果系统中没有柱面镜,各个视场的干涉图叠加在探测器上,如图 9 所示,探测器仅取了中心 100×100 个像元,从图 9 中难以获取各个视场的光谱信息。双视场干涉仪系统中,同样的 6 个光源得到的干涉图如图 10 所示,各个谱线的干涉条纹在垂直主截面方向的一维被成像在探测器的不同位置。

双视场结构多普勒外差干涉仪使同一目标区域的风场在 45° 方向和 135° 方向被先后探测,不同视场探测的谱线产生的干涉条纹被成像在探测器不同的位置。

图 11 是 630 nm 谱线的干涉图曲线,从图 10 中第一个视场中读取,理论上,谱线 630 nm 的条纹周期为 $86.7944 \mu\text{m}$,在如图所示的坐标范围($x = -0.65 \sim 0.65 \text{ mm}$)应有 15 个条纹周期,图 11 中出现了 16 个条纹周期,

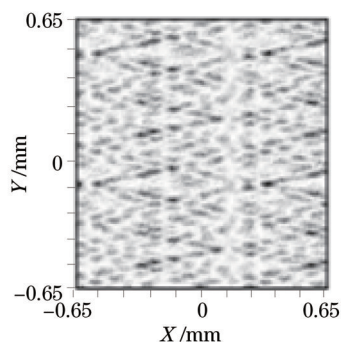


图9 系统中无柱面镜时的干涉图

Fig.9 Interferogram of the system without cylindrical lens

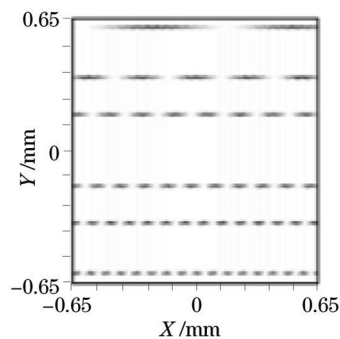


图10 系统中有柱面镜时的干涉图

Fig.10 Interferogram of the system with cylindrical lens

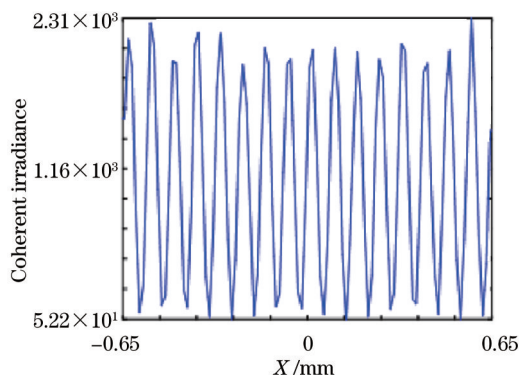


图11 系统中有柱面镜时630 nm的干涉图

Fig.11 Interferogram of 630 nm emission in the system with cylindrical lens

这是由于扩视场棱镜的色散引起的干涉条纹频率变化。考虑扩视场棱镜的色散,630 nm 谱线干涉条纹的实际周期应为 $80.4602 \mu\text{m}$,与仿真结果相符。

6 结 论

提出了一种适合星载应用的双视场准共路多普勒外差干涉仪方案,分析了基于 Kösters 棱镜干涉仪非对称量与系统参数的关系,光线以最小偏向角入射到扩视场棱镜时,非对称量仅与系统利特罗角和光轴入射到分光棱镜高度有关。针对氧原子红线($\text{O}[\text{I}]\text{D}630 \text{ nm}$)给出了设计,通过仿真不同视场的干涉图,并与没有柱面镜系统得到的干涉图比较,说明了方案的可行性:在不使用视场扫描装置的情况下就可以获得两视场方向不同高度的干涉图,再通过卫星平台运动获得同一目标区域的风场矢量信息。

参 考 文 献

- 1 Christoph R Englert, John M Harlander, David D Babcock, et al.. Doppler asymmetric spatial heterodyne spectroscopy (DASH): an innovative concept for measuring winds in planetary atmospheres [C]. SPIE, 2006, 6303: 63030T.
- 2 G G Shepherd, G Thuillier, W A Gault, et al.. WINDII, the wind imaging interferometer on the upper atmosphere research satellite [J]. Journal of Geophysical Research, 1993, 98(D6): 10725-10750.
- 3 Gordon G Shepherd. Application of Doppler Michelson imaging to upper atmospheric wind measurement: WINDII and beyond [J]. Appl Opt, 1996, 35(16): 2764-2773.
- 4 Paul B Hays, Vincent J Abreu, Michael E Dobbs, et al.. The high-resolution Doppler imager on the upper atmosphere research satellite [J]. Journal of Geophysical Research, 1993, 98(D6): 10713-10723.
- 5 Christoph R Englert, John M Harlander, John T Emmert, et al.. Initial ground-based thermospheric wind measurements using Doppler asymmetric spatial heterodyne spectroscopy (DASH) [J]. Opt Express, 2010, 18(26): 27416-27429.
- 6 R Niciejewski, Q Wu, W Skinner, et al.. TIMED Doppler interferometer on the thermosphere ionosphere mesosphere energetic and dynamics satellite: data product overview [J]. Journal of Geophysical Research, 2006, 111(A11): A11S90.

- 7 Christoph R Englert, David D Babcock, John M Harlander, *et al.*. Doppler asymmetric spatial heterodyne spectroscopy (DASH): concept and experimental demonstration [J]. *Appl Opt*, 2007, 46(29): 7297–7306.
- 8 Ye Song, Fang Yonghua, Hong Jin, *et al.*. System design of spatial heterodyne spectrometer [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2006, 14(6): 959–964.
叶 松, 方勇华, 洪 津, 等. 空间外差光谱仪系统设计[J]. *光学 精密工程*, 2006, 14(6): 959–964.
- 9 Xiong Wei, Shi Hailiang, Wang Yuanjun, *et al.*. Study on near-infrared spatial heterodyne spectrometer and detection of water vapor [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(5): 1511–1515.
熊 伟, 施海亮, 汪元钧, 等. 近红外空间外差光谱仪及水汽探测研究[J]. *光学学报*, 2010, 30(5): 1511–1515.
- 10 Feng Yutao, Bai Qinglan, Wang Yongmei, *et al.*. Theory and method for designing field-widened prism of spatial heterodyne spectrometer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(10): 1030001.
冯玉涛, 白清兰, 王咏梅, 等. 空间外差光谱仪视场展宽棱镜设计理论与方法[J]. *光学学报*, 2012, 32(10): 1030001.
- 11 John M Harlander, Christoph R Englert, David D Babcock, *et al.*. Design and laboratory tests of a Doppler asymmetric spatial heterodyne (DASH) interferometer for upper atmospheric wind and temperature observations [J]. *Opt Express*, 2010, 18(25): 26430–26440.

栏目编辑: 韩 峰